



A new attempt for deformity correction: Mechanical analysis of scoliosis correction by finite element method

Abe, Yuichiro; Ito, Manabu; Abumi, Kuniyoshi; Salmingo, Remel A.; Tadano, Shigeru

Published in:
Hokkaido Seikei Saigai Geka Gakkai Zasshi

Publication date:
2013

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Abe, Y., Ito, M., Abumi, K., Salmingo, R. A., & Tadano, S. (2013). A new attempt for deformity correction: Mechanical analysis of scoliosis correction by finite element method. *Hokkaido Seikei Saigai Geka Gakkai Zasshi*, 54(2), 201-208.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

北海道の脊柱変形医療 —診断と治療—

変形矯正に対する新しい試み
：有限要素法による側弯矯正手法の力学解析安倍雄一郎^{1,2}，伊東 学³，鐙 邦芳⁴，Remel Salmingo⁵，但野 茂⁵

1. 我汝会えにわ病院整形外科
2. 北海道大学大学院医学研究科整形外科
3. 北海道大学大学院医学研究科脊椎脊髄先端医学講座
4. 北海道大学大学院医学研究科体幹支持再建医学講座
5. 北海道大学大学院工学研究院人間機械システムデザイン部門バイオメカニカルデザイン研究室

はじめに

特発性側弯症に対する後方矯正手技は内固定金属を用いて三次元的に行われることが一般的である。Sukら¹⁶が報告したsegmental pedicle screw fixationは強固な固定アンカーの獲得を可能とし、direct vertebral rotation (DVR) 等の新しい手法に対応したインストゥルメントの発達により側弯矯正および椎体回旋矯正の成績は飛躍的に向上した^{6,10}。その一方で、これらの手技革新がもたらす良好な矯正は固定アンカーを介して脊椎に加えられる力の増大を意味しており、スクリューの引き抜けやPlowingに代表される固定アンカーの破綻が新たな問題となってきた¹⁸。われわれは、後方矯正固定術に使用する内固定金属の形状変化を三次元的に追跡することで矯正操作時に脊椎に加えられる力の定量化を行ってきた¹³⁻¹⁵。本稿ではLenke type 1および3の特発性側弯症に対する後方矯正固定術の検討から、矯正操作における力学解析の実際と今後の課題について述べる。

当科における側弯矯正手技の工夫

回旋を伴う側弯の矯正に三次元的手法がとりいれられたのは1983年にCotrelらが報告したrod rotation maneuverが最初とされている²。この手法は側弯に沿って湾曲した金属性のロッドを回旋させることによって側弯を胸椎後弯へと変換するものであり、現在でもロッド回旋を用いた種々の矯正法の基本とされる概念である。椎弓根スクリューの強固な固定力を生かして頂椎付近の椎体へ回旋操作を加えるDVR手技が2004年に

Lee, Sukらにより報告され、これら二つの手技を組み合わせた凹側ロッドのsingle rod rotation maneuver + DVRが多く用いられるようになった^{6,10,16}。この方法はより良い側弯矯正と椎体回旋矯正をもたらしたが、DVRが主に頂椎の凸側を腹側へと押し込むことで回旋矯正を行う手技であったことから、矯正後の胸椎後弯の減少、いわゆるflat backという新しい課題を生み出した^{1,5}。

われわれは2008年より2本の矯正ロッドを同時に回旋させ矯正を行うSimultaneous Double Rod Rotation Technique (SDRRT)を用いている⁴。SDRRTでは椎体に対する固定アンカーとしてポリアキシャルスクリューを用い、曲率の異なる2本のロッドを同時に回旋することで頂椎を中心として全ての椎体に矯正力を伝える点が従来のsingle rodを用いる方法と異なる点である。本手法においてはDVRと異なり椎体を腹側へ押し込む力を加えずに、背側へと持ち上げることで胸椎後弯の獲得が可能である。初期の症例においては凸側と凹側のロッドを連結せずに矯正操作を施行していたが、2010年より頂椎付近で左右のロッドを連結し椎体凹側を持ち上げるクロスリンクシステムを導入している。

対象と方法

2009年6月から2011年6月までに北海道大学病院でSDRRTにより手術を施行された特発性側弯症症例のうち、力学解析のための術中インプラント形状採取を行ったLenke Type 1および3の20例を対象とした。前半の10例（男性1例，女性9例）はクロスリンクを用

表1 w/o群とC群の詳細

	w/o群 (n=10)	C群 (n=10)
女/男	9/1	10/0
手術時平均年齢	13.7	15.8
Lenke分類	Type 1 : 8例 Type 3 : 2例	Type 1 : 10例
固定椎間数	9.4	8.6

表2 ロッドのマテリアルプロパティ

Ti-6 Al-7 Nb	
Young's Modulus (E)	105 GPa
yield stress (σ_Y)	900 MPa
yield strain (ϵ_Y)	0.00857
hardening coefficient (H)	2.4 GPa

いずに矯正操作を行った群 (w/o群) とし、後半の10例 (全例女性) はクロスリンクを使用した群 (C群) とした。患者群の詳細を表1に示す。インプラントは全例USS II (Synthes社) を用い、径6 mmのチタン合金性ロッド (Ti-6 Al-7 Nb (Extra hard)) を使用した。術中矯正前にロッドの形状をトレースし、術後ロッド形状は3次元CT像から三次元的に採取した。術中矯正前および術後のロッド形状をCADソフトウェアを用いて立体化し、独自に開発した弾塑性モデルを使用してANSYS11.0にて有限要素解析を行った^{13,14}。使用金属のマテリアルプロパティはJIS規格 (JIS T7401-3) に従い表2の数値を使用した。

評価項目は、レントゲン評価として術前および術後の立位X線像による主胸椎カーブのCobb角、矯正率、胸椎後弯角 (T5-12) を測定した。ロッド変形の指標として、頭尾側端の角度 (Rod Contour : RC, 3°以上の変化を有意とした) を測定した。有限要素解析では、それぞれのアンカーポイントに生じる引き抜き力 (pull-out force) および押し込み力 (push-in

force) を凹側のロッドについて計算した。

結 果

1. 立位レントゲン評価

主胸椎カーブのCobb角はw/o群で術前66.6±6.2°, 術後23.6±4.0°, 矯正率は64.7±3.5%であり, C群で術前59.9±5.8°, 術後13.2±4.6°, 矯正率は77.3±9.3%であった。C群において術後Cobb角は有意に小さく, また矯正率は有意に高値であった。胸椎後弯角 (T5-12) はw/o群で術前13.1±7.9°, 術後23.6±7.1°であり, C群で術前6.7±8.3°, 術後19.7±4.7°といずれもC群で低値であるが, 2群間に有意差は認めず, 後弯獲得量もw/o群10.5±5.2°, C群13.0±8.2°と有意差を認めなかった (図1)。

2. ロッド変形量

凹側のRod Contour (RC) はw/o群で矯正前34.8±14.3°, 術後CT17.3±11.0°, 平均変化量は-50.3%であり, C群で矯正前32.7±11.4°, 術後CT18.2±9.6°, 平均変化量は-44.4%であった (図2)。凹側ロッドの平均変化量では2群間に有意差を認めなかった。凸側のRCはw/o群で矯正前26.1±6.5°, 術後CT25.6±6.4°, 平均変化量は-1.9%であり全例で3°未満であった。C群では矯正前25.7±8.7°, 術後CT22.2±7.4°, 平均変化量は-13.7%であり, (図3) 3°以上のRC変化を認めたものが5例あった。

3. 有限要素解析

凸側ロッドのRCがw/o群では全例3°以下と解析上有意な変化を示さなかったため, 凹側ロッド

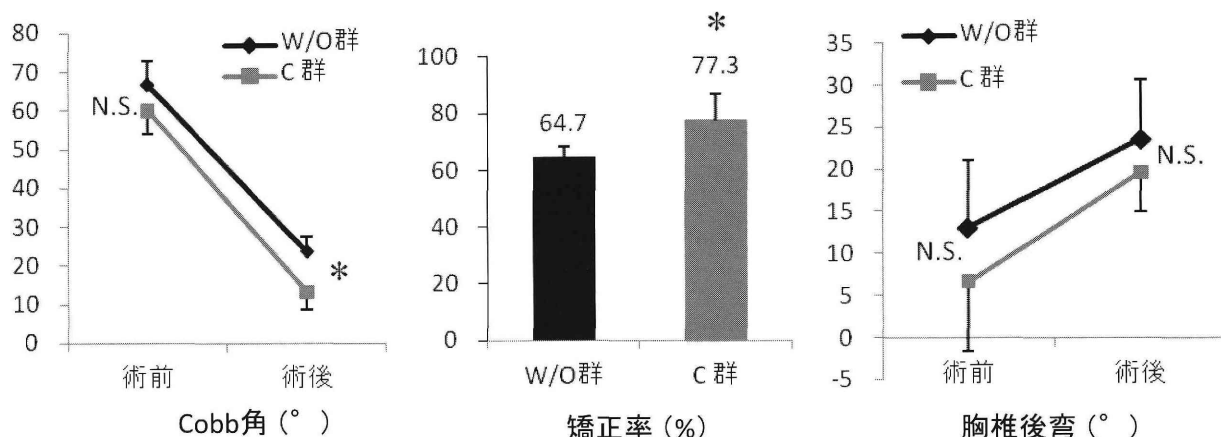


図1 Cobb角, Cobb角矯正率および胸椎後弯の変化

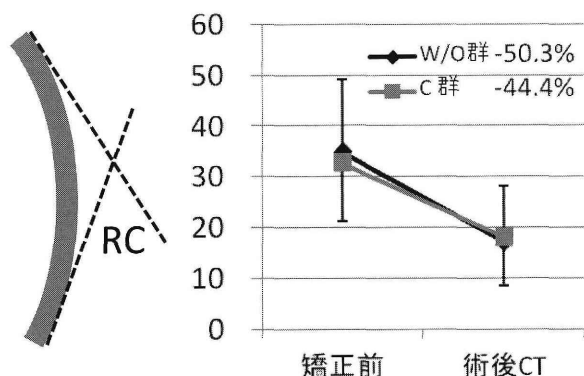


図2 凹側ロッドにおけるRod Contour (RC)の変化

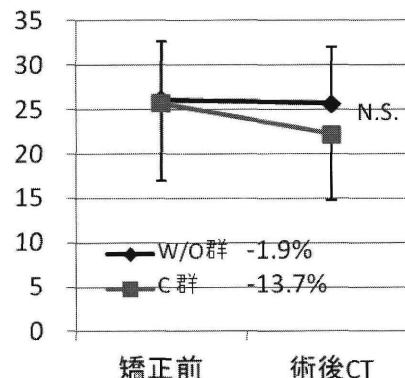


図3 凸側ロッドにおけるRCの変化

について有限要素解析を行った。すべての症例においてロッドの上下端のスクリューには最大のpush-in forceが働き、頂椎を中心としてpull-out forceが働いていた。上下端のスクリューに働くpush-in forceの最大値はw/o群で平均288N (range: 137–572N), C群で平均322N (range: 159–563N)とC群で大きい傾向であったが有意差は無かった。各症例でのpull-out forceの最大値はw/o群で平均150N (range: 89–459N), C群で平均169N (range: 71–364N)と量群間に有意差は無かった。引き抜き方向に力が働いていたスクリューの平均pull-out forceはw/o群で117N, C群で140Nであった (図4)。

症例提示

症例1

12才女児，特発性側弯症Lenke Type 1 A– T 6 – L 2：83° 胸椎後弯 (T 5 – 12) 9° が術後それぞれ14°，26°へと矯正された。凹側へ挿入したロッドは矯正前で34.4°の弯曲を有していたが，術後CTでは18.6°まで弯曲が減じていた。全ての椎体へスクリューが刺入されており，各スクリューへ働くpull-out forceはなだらかに推移している。凹側頂椎での最大pull-out forceは176Nであり，最下端のL 2 に働くpush-in forceは392Nであった (図5)。

症例2

14才女児，特発性側弯症Lenke Type 1 AN T 6 – L 1：68° 胸椎後弯 (T 5 – 12) 12° が術後それぞれ18°，22°へと矯正された。凹側へ挿入したロッドは矯正前で39.8°の弯曲を有していたが，術後CTでは15.9°まで弯曲が減じていた。凹側において頂椎を中心に3椎体でスクリューを刺入せず高分子ポリエチレ

ンテープを使用している。凹側のT 7 およびT11に働くpull-out forceはそれぞれ400N, 452Nと大きな値を示した。最下端のL 1 に働くpush-in forceは579Nであった (図6)。

症例3

16才女児，特発性側弯症Lenke Type 1 A– T 6 – L 2：63° 胸椎後弯 (T 5 – 12) 8° が術後それぞれ11°，20°へと矯正された。凹側へ挿入したロッドは矯正前で28.8°，術後CTでは13.6°まで弯曲が減じており，頂椎凹側に働くpull-out forceは137Nであった。矯正操作時にクロスリンクシステムを使用しており，凸側のロッドも20.1°から14.2°と矯正操作により5.9°の弯曲の減少を示し，頂椎凸側に働くpull-out forceは37Nであった (図7)。

考 察

1. 矯正操作 (Rod rotation maneuver) における凹側ロッドの力学的役割

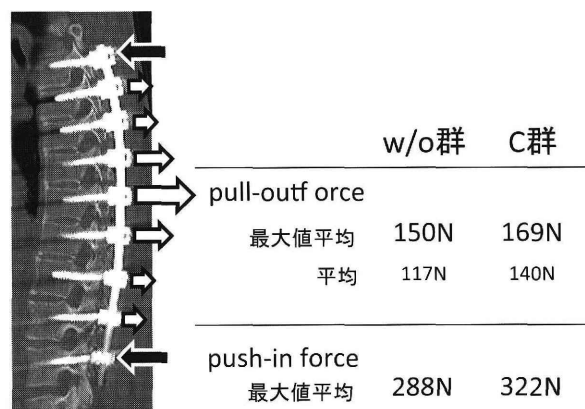


図4 有限要素解析によるスクリューへ働く力の推定
ロッドの上下端のスクリューにはpush-in forceが，頂椎を中心としてpull-out forceが働いていた。

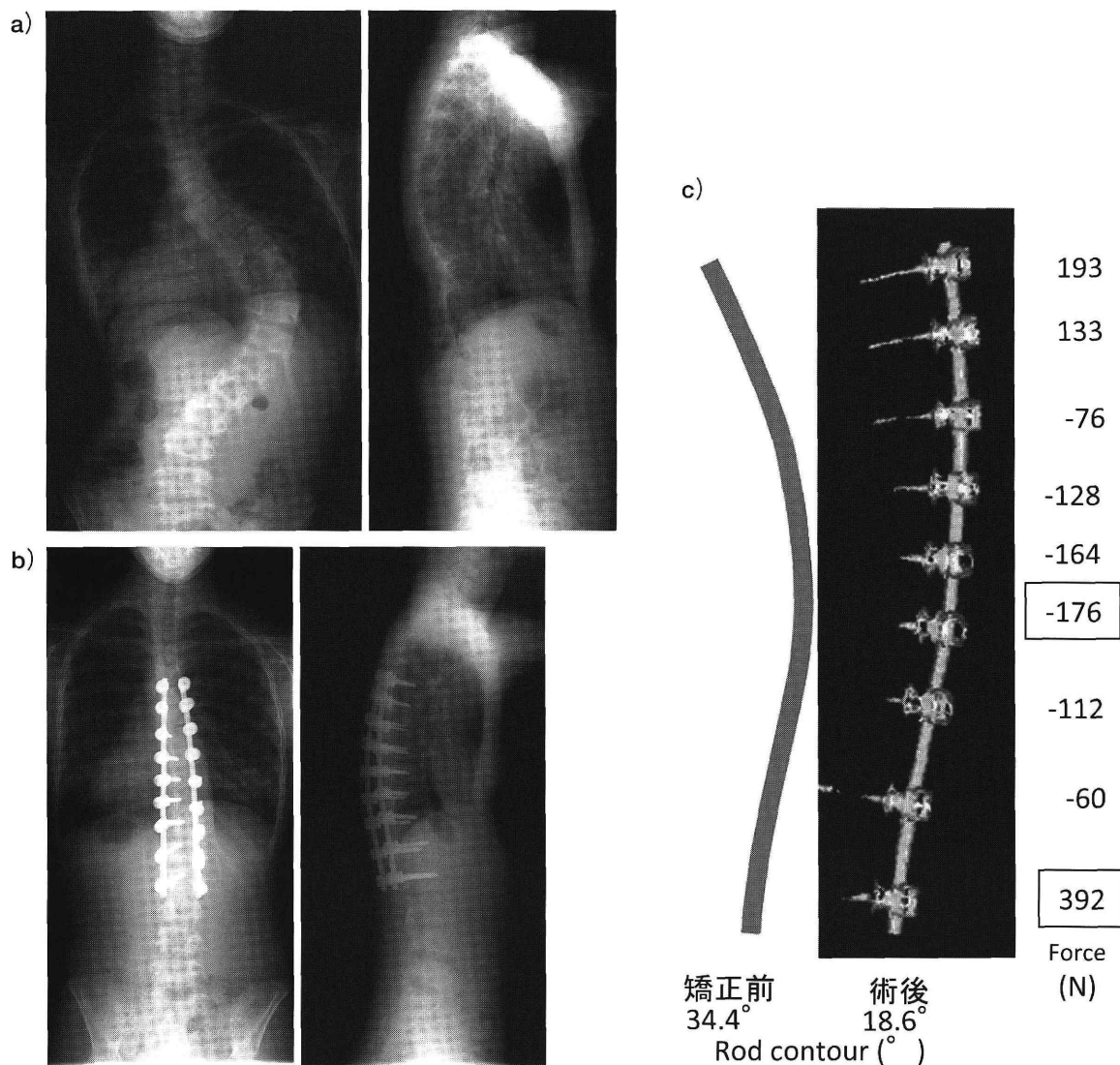


図5 症例1 Lenke Type 1 A-

a) 術前立位XP

b) 術後立位XP

c) 矯正前および術後の凹側ロッド形状。Rod contourは34.4°から18.6°に減少している。全ての椎体にスクリーが使用されておりpull-out forceはなだらかに推移している。

脊柱側弯症に対する後方矯正手技は、変形した脊柱が持つ剛性を上回る強度の内固定金属によって矯正位を保持する力学現象であり、Harrington法から現在に至るまでその原則は変わっていない。ISOLA systemによるHybrid法を経て、近年ではsegmental pedicle screw (SPS) 法の普及によって強固な固定アンカーが使用可能となり、矯正率は飛躍的に向上した^{7,17}。その一方で、実際の矯正操作において脊柱に加えられる力の解析は、これまでほとんど行われていないのが現状である^{8,19}。その理由として、側弯症手術では多数のアンカーに対して複雑な操作で矯正が行われるために、応力ゲージなどを用いた一般的手法による定量解析が困難であったことが挙げられる。われわれが用

いているSDRRTでは2本のロッドを同時に回旋させる手技であり操作そのものが単純であることと、In situベンディング等の追加的塑性変形操作を行わないために、ロッドの形状変化から脊椎に加えられた矯正力を推測することが可能であった^{13,14}。本手技においては、凹側のロッドに働く力は150–300Nであったが、Louら⁸が報告したCD法でのderotationデバイスに加えられる力が22–57Nであったことと比較すると、矯正手技の違いで5倍以上の差異がある。この事実は手技の変化による良好な矯正率の獲得が、固定アンカーにかかる負荷の増大によってなされているという考えを支持している。特に頂椎を中心とした凹側3本のスクリーに加えられるpull-out forceの合計は

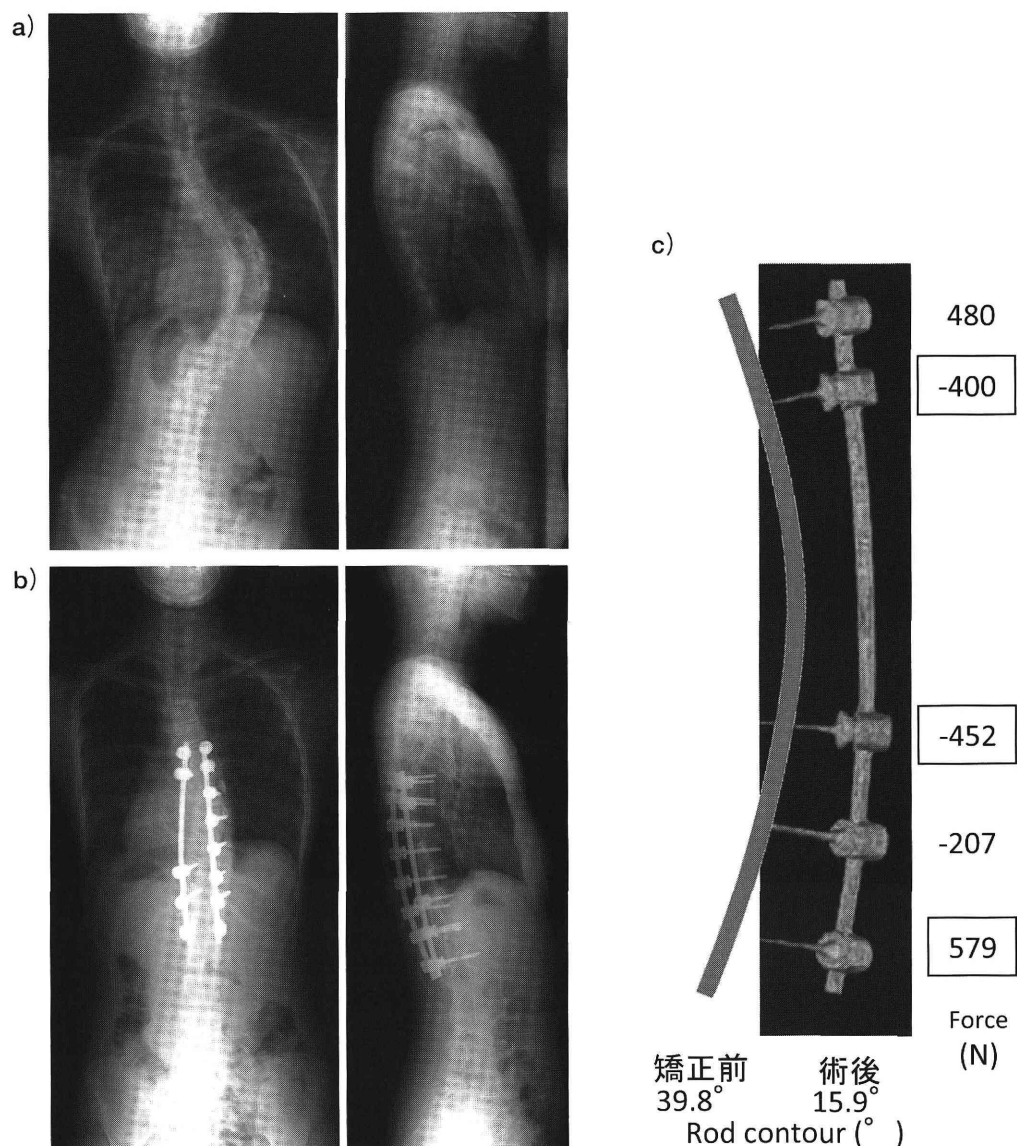


図6 症例2 Lenke Type 1 AN

a) 術前立位XP

b) 術後立位XP

c) 矯正前および術後の凹側ロッド形状. Rod contourは 39.8° から 15.9° に減少している. 凹側頂椎を中心に3椎体でスクリューを刺入せず高分子ポリエチレンテープを使用している. T7およびT11に働くpull-out forceはそれぞれ400N, 452Nと大きな値を示した.

500Nに達し, この3本のスクリューのみで患者を宙にぶら下げることができるほどの大きな力が矯正操作で生じていることは驚くべき事実といえよう.

2. SDRRTにおいてクロスリンクシステムが果たす役割

矯正時に頂椎アンカーを左右で連結するクロスリンクシステムを導入したことで, Cobb角矯正率は64.7%から77.3%へと有意に改善した. Cobb角矯正率の改善に伴う胸椎後弯の減弱は見られず, クロスリンクシステム導入群でも術後胸

椎後弯は 19.7° と保たれ, 後弯獲得量も 13° と導入前に劣ることは無かった. 興味深いことに, 凹側に加えられる矯正力はそれぞれのアンカーで10%ほどしか増加しておらず, その差は有意なものでは無かった. これは, 凹側のロッドに生じる過度の力がクロスリンクシステムを介して凸側のロッドへと分散されている可能性を示唆している. クロスリンク導入前では凸側ロッドの弯曲変化量は全例で 3° 未満であったが, クロスリンク導入後の症例では提示症例3に示した如く, 半数の5例に凸側のロッドの有意な変化が認められている. これまでの報告によると, 矯正時に使用される

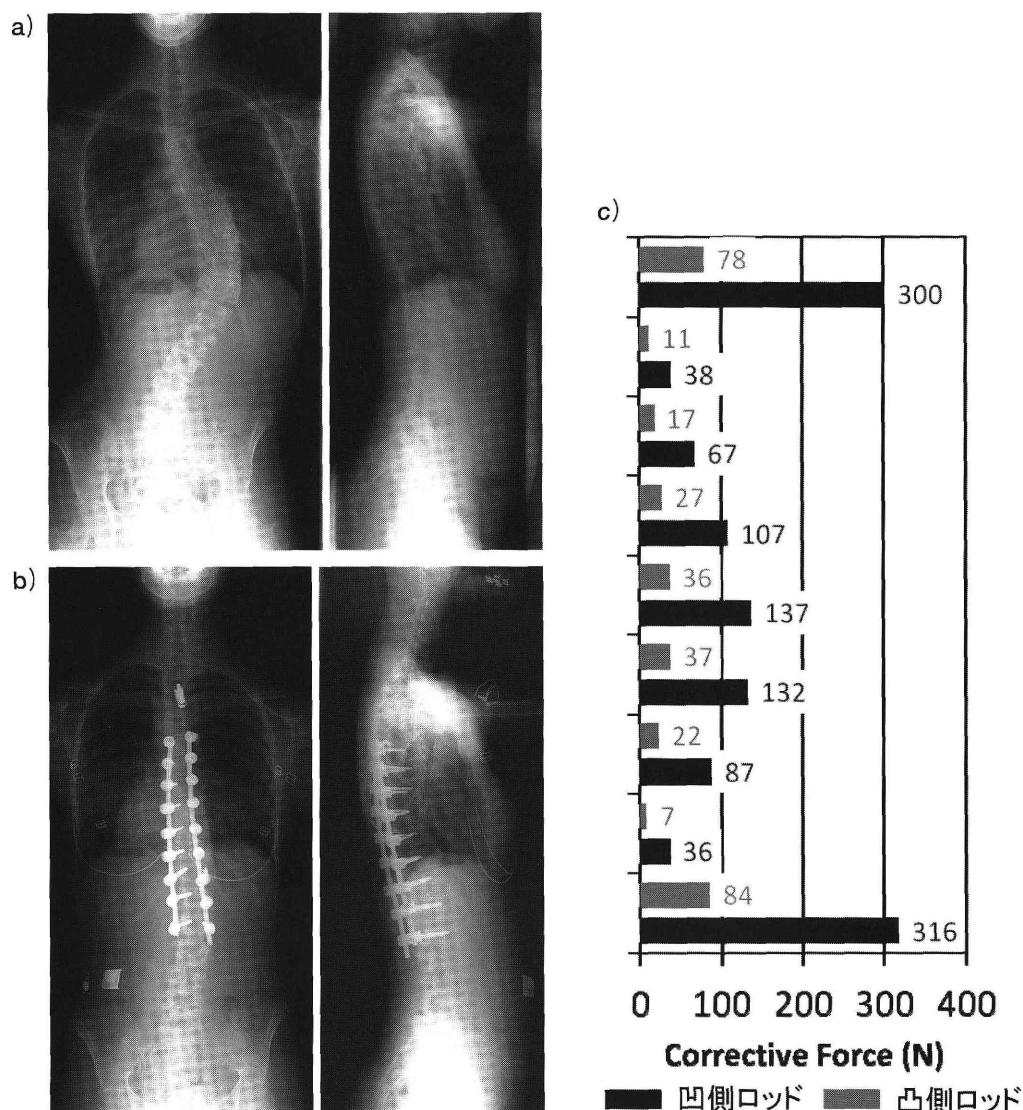


図7 症例3 Lenke Type 1 A-

a) 術前立位XP

b) 術後立位XP

c) 凹側および凸側の術後ロッド形状。矯正操作時にクロスリンクシステムを使用しており、両側ともにRod contourが減少した、有限要素解析による頂椎でのpull-out forceはそれぞれ凹側で137N、凸側で37Nであり、クロスリンクシステムを介して矯正力が左右のロッドに分散している。

ロッドとしては5.5–6.35mm径のチタン合金が多く、手技の別を問わず凹側のロッドの直線化による後弯減少が問題視されている^{1,5,9}。後弯獲得を含めた良好な矯正の獲得のためには、使用している金属の物性を理解し最も効率的に2本のロッドに矯正力を発揮させる工夫が一層重要であると考ええる。

3. 固定アンカーに加わる力の大きさに関与する因子

矯正手技を行うにあたっては、いかなる強力なロッドやデバイスを用いても固定アンカーを支える椎体の強度を超えて矯正力を発現することは出来ないという原則に留意する必要がある。新鮮屍

体による力学研究では、中位胸椎のスクリー引き抜き強度は500–800N程度とされており^{3,11,21}、本研究の結果からはSDRRTによる矯正操作はアンカー強度に十分な安全マージンを確保できていることが明らかとなった。SukらはDVR手技におけるロッドの直線化を問題視し、“これを防ぐためにより硬いロッドを使用しなければならない”と述べており¹⁶、以降さまざまな物性を持つ金属が試されてきた。近年では従来のステンレス合金やチタン合金に加えてコバルトクロム合金などのより剛性の高い素材が使用可能となっている。しかし、これらの高剛性素材を従来の手技に導入することについての安全性については未だ不明な点

が多く、今後詳細な検討が必要であると考えられる。

高剛性素材の出現とともに無視できない因子に、設置アンカー数の問題がある。近年欧米を中心に医療経済的な見地から、矯正固定術に使用される固定アンカー数は減少する傾向にある。70°程度のいわゆる“mild”な特発性側弯症においては、使用されたスクリュー数と矯正率に相関は無いとする報告や、一椎体あたりのインプラント濃度は1.0すなわち左右どちらかで十分であるという報告も見られるようになってきている^{12,20}。われわれの開発した有限要素モデルによる試算では、すべての椎弓根にスクリューを設置した場合（インプラント濃度＝2.0）と比較して、スクリューを半数に減じると凹側頂椎スクリューにかかる力は2.5倍へ上昇した。側弯症手術において、矯正操作による椎弓根の破壊を伴うスクリュー穿破、いわゆる“plowing”は主に頂椎付近で生じ易いことが知られており¹⁸、頂椎でのスクリューの脱転や椎弓根の破断は大血管や脊髄合併症を引き起こす可能性がある。固定アンカーの省略の判断は十分な根拠のもとに行われるべきであると考ええる。

単位アンカーあたりの負荷を減じるためには、前述の如くアンカー数を増やすことが効果的であるが、脊椎の剛性を減じて椎間の可動性を確保することは矯正に必要なエネルギーを低下させる効果があり、極めて有効である。Ponte osteotomyや肋横関節の解離、または椎間板切除を含めた前方解離等の基本手技の適切な併用も、インプラントやデバイスの選択と同等に重要な要素である。

ま と め

特発性側弯症に対する後方矯正固定術において、内固定金属が担っている力学的な役割を有限要素解析手法によって明らかにした。矯正手技で発生する力を左右のロッドに効率よく分散することで、各椎体への効果的な矯正力の分配が可能となり、また特定のスクリューへの過度の応力集中を防ぐことができる。金属材料の開発に伴い種々の強力なインプラントが使用できるようになったが、安全な矯正操作を行うためには材料の物性を理解し適切な手技の組み合わせを選択することが肝要である。

Conflict of interest statement

本論文を執筆するに当たり、関係するいかなる企業からも利益を得ておりません。

Key word :

側弯症（Scoliosis）、脊椎矯正固定術（Spinal reconstructive fusion surgery）、有限要素モデル解析（Finite element model analysis）

文 献

1. Cheng I, Kim Y, Gupta MC, Bridwell KH, Hurford RK, Lee SS, et al : Apical sublaminar wires versus pedicle screws--which provides better results for surgical correction of adolescent idiopathic scoliosis? **Spine (Phila Pa 1976)** **30** : 2104-2112, 2005
2. Cotrel Y, Dubousset J : [A new technic for segmental spinal osteosynthesis using the posterior approach]. **Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot** **70** : 489-494, 1984
3. Gayet LE, Pries P, Hamcha H, Clarac JP, Texereau J : Biomechanical study and digital modeling of traction resistance in posterior thoracic implants. **Spine (Phila Pa 1976)** **27** : 707-714, 2002
4. Ito M, Abumi K, Kotani Y, Takahata M, Sudo H, Hojo Y, et al : Simultaneous double-rod rotation technique in posterior instrumentation surgery for correction of adolescent idiopathic scoliosis. **J Neurosurg Spine** **12** : 293-300, 2010
5. Kim YJ, Lenke LG, Kim J, Bridwell KH, Cho SK, Cheh G, et al : Comparative analysis of pedicle screw versus hybrid instrumentation in posterior spinal fusion of adolescent idiopathic scoliosis. **Spine (Phila Pa 1976)** **31** : 291-298, 2006
6. Lee SM, Suk SI, Chung ER : Direct vertebral rotation : a new technique of three-dimensional deformity correction with segmental pedicle screw fixation in adolescent idiopathic scoliosis. **Spine (Phila Pa 1976)** **29** : 343-349, 2004
7. Lenke LG : Debate : Resolved, a 55 degrees right thoracic adolescent idiopathic scoliotic curve should be treated by posterior spinal fusion and segmental instrumentation using thoracic pedicle screws : Pro : Thoracic pedicle screws should be used to treat a 55 degrees right thoracic adolescent idiopathic scoliosis. **J Pediatr Orthop** **24** : 329-334 ; discussion 338-

- 321, 2004
8. Lou E, Hill DL, Raso JV, Moreau MJ, Mahood JK : Instrumented rod rotator system for spinal surgery. **Med Biol Eng Comput** **40** : 376–379, 2002
 9. Luk KD, Vidyadhara S, Lu DS, Wong YW, Cheung WY, Cheung KM : Coupling between sagittal and frontal plane deformity correction in idiopathic thoracic scoliosis and its relationship with postoperative sagittal alignment. **Spine (Phila Pa 1976)** **35** : 1158–1164, 2010
 10. Mladenov KV, Vaeterlein C, Stuecker R : Selective posterior thoracic fusion by means of direct vertebral derotation in adolescent idiopathic scoliosis : effects on the sagittal alignment. **Eur Spine J** **20** : 1114–1117, 2011
 11. Pfeiffer M, Gilbertson LG, Goel VK, Griss P, Keller JC, Ryken TC, et al : Effect of specimen fixation method on pullout tests of pedicle screws. **Spine (Phila Pa 1976)** **21** : 1037–1044, 1996
 12. Quan GM, Gibson MJ : Correction of main thoracic adolescent idiopathic scoliosis using pedicle screw instrumentation : does higher implant density improve correction? **Spine (Phila Pa 1976)** **35** : 562–567, 2010
 13. Salmingo R, Tadano S, Fujisaki K, Abe Y, Ito M : Corrective force analysis for scoliosis from implant rod deformation. **Clin Biomech (Bristol, Avon)** **27** : 545–550, 2012
 14. Salmingo RA, Tadano S, Fujisaki K, Abe Y, Ito M : Relationship of forces acting on implant rods and degree of scoliosis correction. **Clin Biomech (Bristol, Avon)**, 2012
 15. Salmingo RA, Tadano S, Fujisaki K, Abe Y, Ito M : A simple method for in vivo measurement of implant rod three-dimensional geometry during scoliosis surgery. **J Biomech Eng** **134** : 054502, 2012
 16. Suk SI, Kim JH, Kim SS, Lim DJ : Pedicle screw instrumentation in adolescent idiopathic scoliosis (AIS). **Eur Spine J** **21** : 13–22, 2012
 17. Suk SI, Lee CK, Kim WJ, Chung YJ, Park YB : Segmental pedicle screw fixation in the treatment of thoracic idiopathic scoliosis. **Spine (Phila Pa 1976)** **20** : 1399–1405, 1995
 18. Wagner MR, Flores JB, Sanpera I, Herrera-Soto J : Aortic abutment after direct vertebral rotation : plowing of pedicle screws. **Spine (Phila Pa 1976)** **36** : 243–247, 2011
 19. Wang X, Aubin CE, Crandall D, Labelle H : Biomechanical modeling and analysis of a direct incremental segmental translation system for the instrumentation of scoliotic deformities. **Clin Biomech (Bristol, Avon)** **26** : 548–555, 2011
 20. Yang S, Jones–Quaidoo SM, Eager M, Griffin JW, Reddi V, Novicoff W, et al : Right adolescent idiopathic thoracic curve (Lenke 1 A and B) : does cost of instrumentation and implant density improve radiographic and cosmetic parameters? **Eur Spine J** **20** : 1039–1047, 2011
 21. Zdeblick TA, Kunz DN, Cooke ME, McCabe R : Pedicle screw pullout strength. Correlation with insertional torque. **Spine (Phila Pa 1976)** **18** : 1673–1676, 1993